

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 07 апреля 2025 г № 83

О присуждении Чэнь Цзяцзюню, гражданину Китайской Народной Республики, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Структурная трансформация азотных примесных центров в алмазе под действием ультракоротких лазерных импульсов» по специальности 1.3.19 — Лазерная физика принята к защите 03 февраля 2025 года, (протокол заседания № 79) диссертационным советом 24.1.262.01, созданным 11 апреля 2012 года приказом № 105/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Чэнь Цзяцзюнь, 27 августа 1995 года рождения, в 2019 году с отличием окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский политехнический университет» по направлению «Материаловедение и технологии материалов». С 2019 года обучался в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук по направлению «Физика и астрономия» и закончил её в 2023 году. Справка об обучении и сдаче кандидатских экзаменов выдана ФИАН в 2023 году. С 2020 года является сотрудником ФИАН. В настоящее время работает в должности высококвалифицированного младшего научного сотрудника в Лаборатории

лазерной нанофизики и биомедицины Отделения квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова.

Диссертационная работа Чэнь Цзяцзюня выполнена в Отделении квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова ФИАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент Кудряшов Сергей Иванович, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией лазерной нанофизики и биомедицины Отделения квантовой радиофизики имени Н.Г. Басова Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Мартынович Евгений Фёдорович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела лазерных и лучевых технологий Иркутского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук;

2. Овчинников Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории 1.2 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»-ТИСНУМ, г. Москва, г. Троицк), в своем положительном отзыве, подписанном кандидатом физико-математических наук Денисовым Виктором Николаевичем, заведующим лабораторией спектральных исследований НИЦ «Курчатовский институт»-ТИСНУМ, и кандидатом физико-математических наук Головановым Антоном Владимировичем, старшим научным

сотрудником лаборатории алмазной электроники НИЦ «Курчатовский институт»-ТИСНУМ, и утвержденном доктором химических наук Мордковичем Владимиром Зальмановичем, заместителем директора НИЦ «Курчатовский институт»-ТИСНУМ, указала, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяющей всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а автор диссертации Чэнь Цзяцзюнь заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Соискатель имеет 19 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 11 работ, из в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, опубликовано 7 работ.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем Чэнь Цзяцзюнем работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в статьях:

1. Permanent optical bleaching in HPHT-diamond via aggregation of C-and NV-centers excited by visible-range femtosecond laser pulses / Kudryashov S., Vins V., Danilov P., Kuzmin E., Muratov A., Kriulina G., Chen J., Kirichenko A., Gulina Y., Ostrikov S., Paholchuk P., Kovalev M., Rodionov N., Levchenko A. // Carbon. – 2023. – Т. 201. – С. 399-407.
2. “Stealth Scripts”: Ultrashort Pulse Laser Luminescent Microscale Encoding of Bulk Diamonds via Ultrafast Multi-Scale Atomistic Structural Transformations / Kudryashov S., Danilov P., Smirnov N., Krasin G., Khmel'nitskii V., Kovalchuk O., Kriulina G., Rimskaya E., Kuzmin E., Chen J., Kovalev M., Levchenko A. // Nanomaterials. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – статья номер 192.
3. Nanoscale Vacancy-Mediated Aggregation, Dissociation, and Splitting of Nitrogen Centers in Natural Diamond Excited by Visible-Range Femtosecond

Laser Pulses/ Kudryashov S., Kriulina G., Danilov P., Kuzmin E., Kirichenko A., Rodionov N., Khmel'nitskii R., Chen J., Rimskaya E., Shur V. // *Nanomaterials*. – 2023. – Т. 13. – №. 2. – статья номер 258.

4. Interactions of Atomistic Nitrogen Optical Centers during Bulk Femtosecond Laser Micromarking of Natural Diamond / Rimskaya E., Kriulina G., Kuzmin E., Kudryashov S., Danilov P., Kirichenko A., Rodionov N., Khmel'nitskii R., Chen J. // *Photonics*. – MDPI, 2023. – Т. 10. – №. 2. – статья номер 135.
5. Up/Down-Scaling Photoluminescent Micromarks Written in Diamond by Ultrashort Laser Pulses: Optical Photoluminescent and Structural Raman Imaging /Danilov P., Kuzmin E., Rimskaya E., Chen J., Khmel'nitskii R., Kirichenko A., Rodionov N., Kudryashov S. // *Micromachines*. – 2022. – Т. 13. – №. 11. – статья номер 1883.

Выбор оппонентов обусловлен их высокой квалификацией и достижениями мирового уровня в сфере изучения лазерной физики и спектроскопии оптических центров в кристаллах. Выбор ведущей организации обусловлен её репутацией признанного научного центра, который проводит исследования в области углеродных материалов, физики твердого тела и алмазной электроники.

Диссертационное исследование Чэнь Цзяцзюня посвящено изучению структурных трансформаций азотных примесных центров в синтетическом и природном алмазах с высоким содержанием азота под воздействием ультракоротких лазерных импульсов. Несмотря на активное развитие лазерных методов создания оптических центров в алмазах за последнее десятилетие, основное внимание уделялось созданию сравнительно простых NV-центров в высокочистых синтетических алмазах. В то же время, в высокоазотных алмазах дефектные центры представлены агрегатами различной сложности и под действием фемтосекундного лазерного облучения могут претерпевать более сложные трансформации, которые остаются малоизученными. В своей работе соискатель провёл систематическое исследование поведения азотных оптических центров в таких алмазах в зависимости от параметров лазерного воздействия. В

результате были зафиксированы изменения их концентрации, а также установлены механизмы агрегации и дизагрегации наиболее распространённых азотных дефектов. Результаты, полученные в диссертационной работе Чэнь Цзяцзюня, имеют практическую ценность для технологий алмазной фотоники и лазерной маркировки алмазов.

В результате проведённых исследований соискатель получил следующие значимые основные результаты:

1. В красном синтетическом алмазе Ib-типа обнаружено локальное обесцвечивание и изменение спектров фотолюминесценции образца при следующих параметрах фемтосекундного лазерного облучения образца: длина волны – 515 нм, числовая апертура фокусирующей оптики $NA = 0.25$, энергия импульсов – 0.6- 1.6 мкДж (интенсивность не превышает 1.5 ТВт/см²). Наблюдаемые спектральные эффекты связываются с многократным уменьшением локальной концентрации С-центров и NV-центров при одновременном увеличении концентрации НЗ-центров. Наблюдаемые изменения можно сопоставить с агрегацией С- и NV-центров в НЗ-центры с участием углеродных I-V пар, фотогенерируемых в относительно низких концентрациях.
2. Механизм генерации углеродных I-V пар в красном синтетическом алмазе Ib-типа под действием жестко фокусированных ($NA = 0.25$) фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 515 нм и энергией в диапазоне 0.6-1.6 мкДж можно связать с межзонным фотовозбуждением электрон-дырочной плазмы в алмазе через двухфотонный промежуточный резонанс С-центра, проявляющимся в форме квадратичного по энергии импульсов уменьшения оптического поглощения С- и NV-центров, соответствующего уменьшению их концентрации.
3. В бесцветном природном алмазе Ia-типа под действием жестко фокусированных ($NA = 0.25$) фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 515 нм при допороговых значениях их энергии (< 0.5 мкДж, оценка интенсивности без учета нелинейных потерь – менее 18 ТВт/см²)

реализуется процесс агрегации исходных А, В1-центров в Н3, Н4-центры, а при более высоких, надпороговых значениях энергии излучения – процесс распада исходных крупных агрегированных центров в NV-центры с участием I-V пар. Эти процессы объясняются присоединением вакансий к А- и В1-центрам при низких концентрациях фотогенерируемых I-V пар в допороговом режиме и отрывом I-V парами атомов азота от крупных агрегированных центров с образованием NV-центров при высоких концентрациях пар в надпороговом режиме.

Научная новизна полученных результатов выражается в следующем:

1. Реализована локальная структурная и соответствующая оптическая модификация высокоазотных синтетического и природного алмазов фемтосекундным лазерным излучением – обесцвечивание красного синтетического алмаза, запись фотолюминесцентных меток в алмазах обоих типов.
2. Обнаружен процесс агрегации мелких (С, NV) азотных центров в крупные (Н3) азотные центры в синтетическом и природном алмазах под действием фемтосекундного лазерного излучения при слабом фотовозбуждении, отвечающем низким концентрациям I-V пар.
3. Обнаружен процесс распада крупных (А, В1, Н3, Н4) азотных центров в NV-центры с участием I-V пар при высоких концентрациях, создаваемых высокоинтенсивным фемтосекундным лазерным излучением.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что впервые осуществлена модификация фемтосекундным лазерным излучением дефектно-примесного состава высокоазотных синтетического и природного алмазов, представляющая общий интерес для фотоники алмазов. Реализован эффект изменения окраски (обесцвечивания) красного высокоазотного синтетического алмаза фемтосекундным лазерным излучением. Обнаружена агрегация мелких (С, NV) азотных центров в крупные (Н3) азотные центры под действием фемтосекундного лазерного излучения при

низких концентрациях I-V пар, представляющая практический интерес для лазерной маркировки алмазов. Обнаружена дизагрегация крупных (A, B1, N3, N4) азотных центров в NV-центры под действием фемтосекундного лазерного излучения при высоких концентрациях I-V пар, также представляющая практический интерес для лазерной маркировки алмазов.

Результаты диссертационной работы Чэнь Цзяцзюня имеют высокую научную и практическую значимость и могут быть использованы в будущих исследованиях на базе НИЦ «Курчатовский институт»-ТИСНУМ, Института спектроскопии РАН, Московского физико-технического института, Физического института имени П. Н. Лебедева РАН, и в других научных учреждениях и наукоемких производствах, связанных с изготовлением и использованием оптических элементов на алмазной матрице.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается повторяемостью экспериментальных данных, полученных с помощью надёжных и проверенных методов. Исследования проводились на современном оборудовании. Теоретические модели хорошо согласуются как с полученными экспериментальными данными, так и с результатами исследований других авторов.

Все основные результаты, включенные в диссертацию Чэнь Цзяцзюня, получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Личный вклад автора заключается в получении и детальном исследовании принципиально новых результатов по лазерно-индуцированным структурным трансформациям азотных дефектных центров в высокоазотных алмазах. В частности, впервые обнаружен и количественно охарактеризован эффект лазерно-индуцированного обесцвечивания высокоазотных синтетических алмазов Ib-типа, обусловленный локальной агрегацией мелких (C и NV) центров в более крупные N3-центры при низких концентрациях вакансий. Кроме того, автором впервые экспериментально выявлены и физически объяснены пороговые механизмы агрегации и дизагрегации азотных центров в природных алмазах IaAB-типа: установлено, что

при энергиях лазерного импульса ниже порога происходит агрегация дефектов А- и В1-типа в Н3- и Н4-центры, а выше порогового значения энергии — наоборот, наблюдается обратный процесс распада крупных агрегатов с генерацией NV-центров. Цели работы были определены научным руководителем, доктором физико-математических наук Кудряшовым Сергеем Ивановичем. Автор совместно с научным руководителем работал над реализацией этих целей.

В ходе защиты соискатель Чэнь Цзяцзюнь аргументированно ответил на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 07 апреля 2025 года диссертационный совет принял решение присудить Чэнь Цзяцзюню учёную степень кандидата физико-математических наук за решение научной задачи по разработке перспективных методов модификации различных азотных оптических центров в высокоазотных алмазах с помощью ультракоротких лазерных импульсов.

При проведении тайного голосования члены диссертационного совета в количестве 21 человека, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.19 — Лазерная физика), участвовавшие в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение учёной степени – 21,
против присуждения учёной степени – 0,
недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета
член-корр. РАН, д.ф.-м.н.

Колачевский Николай Николаевич

Учёный секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Золотько Александр Степанович

07 апреля 2025 г.